



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## SIMULÁTOR LETOUNU KATEGORIE GENERAL AVIATION

FLIGHT SIMULATOR OF GENERAL AVIATION AIRCRAFT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marko Mamula

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Matějů

BRNO 2016

## ZADÁNÍ VŠKP 1

## ZADÁNÍ VŠKP 2



## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce obsahuje přehled nejpoužívanějších komerčních leteckých simulátorů na trhu a shrnuje, jakými způsoby je možné v jednotlivých simulátorech definovat matematicko-fyzikální model letadla. Práce se dále soustředí na letecký simulátor X-Plane a podrobněji popisuje způsob, kterým simulátor X-Plane počítá dynamiku letu. Nejdůležitější součástí práce je vytvoření virtuálního modelu experimentálního letounu VUT-061 Turbo a následné porovnání vybraných letových výkonů simulátoru s hodnotami naměřenými na reálném letounu. Práce také zahrnuje doporučené hardwarové vybavení, potřebné pro fyzické dokončení simulátoru.

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis maps the major and mostly used commercial flight simulator softwares on the market, and points out the main differences in developing the aircraft in each simulator. It focuses on the flight simulator X-Plane and describes how it works with the flight model. The main goal of this thesis is developing a virtual model of an experimental aircraft VUT-061 Turbo and comparing its flight data with the data measured on the actual aircraft. Furthermore it suggests the adequate hardware needed for completing the physical simulator.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

letecké simulátory, hardware pro letecké simulátory, VUT-061 Turbo, X-Plane, Flight Simulator X, Microsoft ESP, Prepar3D

## **KEYWORDS**

flight simulators, hardware for flight simulators, VUT-061 Turbo, X-Plane, Flight Simulator X, Microsoft ESP, Prepar3D



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MAMULA, M. *Simulátor letounu kategorie General Aviation*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Matějů.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Velice rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Matějů. Musím říci, že mě velice překvapilo, s jakým nadšením se mi vždy snažil pomáhat. Uvědomuji si při tom, kolik cenného času a úsilí mé práci věnoval. Přesně takto si představuji ideální přístup vedoucího bakalářské či diplomové práce.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Matějů a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25.5.

.....

Mamula Marko



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>KOMERČNÍ LETECKÉ SIMULÁTORY .....</b>	<b>17</b>
2.1	Microsoft Flight Simulator .....	18
2.2	Microsoft ESP™ .....	18
2.2.1	Matematicko-fyzikální model v Microsoft ESP™ .....	18
2.3	Prepar3D: Lockheed Martin .....	19
2.4	FlightGear .....	19
2.5	X-Plane 10 .....	20
2.5.1	Rozklad geometrického modelu .....	20
2.5.2	Určení rychlosti .....	21
2.5.3	Stanovení součinitelů .....	21
2.5.4	Výslednice sil .....	21
2.5.5	Definice profilu křídla v programu Airfoil-Maker .....	21
2.5.6	Plane-Maker .....	22
2.5.7	Získání letových dat .....	22
2.5.8	Rozšíření X-Plane prostřednictvím pluginů .....	22
<b>3</b>	<b>LETOUN VUT-061 TURBO .....</b>	<b>23</b>
3.1	Popis letounu .....	23
3.1.1	Rozměry letounu .....	23
3.1.2	Hmotnosti .....	23
3.1.3	Pohonná soustava .....	23
3.1.4	Vrtule .....	23
3.1.5	Třípohledový výkres .....	24
<b>4</b>	<b>VÝVOJ FYZIKÁLNÍHO MODELU .....</b>	<b>25</b>
4.1	Zjednodušení .....	25
4.2	Seznam hodnot použitých při tvorbě modelu .....	26
4.3	Vytvoření grafického modelu .....	27
4.4	Vývoj virtuální 3D kabiny .....	28
4.5	Časový rozsah vývoje virtuálního modelu .....	29
<b>5</b>	<b>SROVNÁNÍ VÝKONŮ MODELU LETOUNU V X-PLANE S LETOVÝM MĚŘENÍM.....</b>	<b>30</b>
5.1	Pádové rychlosti .....	30
5.2	Maximální rychlost .....	30
5.3	Pilové lety .....	31
5.3.1	Postup měření pilových letů .....	31
5.3.2	Aerodynamické charakteristiky virtuálního letounu .....	32
5.4	Klesavý let .....	33
5.5	Stoupavý let .....	33
<b>6</b>	<b>HARDWAROVÉ VYBAVENÍ SIMULATORU .....</b>	<b>35</b>
6.1	Varianta 1 (do 100 000 Kč) .....	35
6.2	Varianta 2 (do 50 000 Kč) .....	38
6.3	Varianta 3 (do 10 000 – 30 000 Kč) .....	39
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>
7.1	Výběr simulátoru .....	41

7.2	Vývoj virtuálního modelu .....	41
7.3	Výsledný virtuální model.....	41
7.4	Fyzické dokončení simulátoru .....	42
7.5	Možné směry dalšího rozvoje tématu .....	42
7.6	Závěrečné hodnocení .....	42
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>46</b>

# 1 ÚVOD

---

V dnešní době existuje mnoho leteckých simulátorů dostupných pro domácí použití. Lze obecně říci, že se nejedná o počítačové hry, nýbrž o sofistikované software, umožňující téměř dokonalou simulaci letového provozu. Tato bakalářská práce se nesnaží porovnat přesnost jednotlivých simulátorů, nýbrž porovnává způsoby, kterými lze v jednotlivých simulátorech definovat samotný letový model virtuálního letounu. Klíčovou součástí práce je vývoj letounu VUT-061 Turbo (obr. 1-1) pro simulátor X-Plane.

Výstupem práce je porovnání výkonů modelu letounu (pádových rychlostí, maximální rychlosti, poláry a stoupacích a klesacích rychlostí) uvnitř simulátoru a zhodnocení, do jaké míry se shodují s hodnotami předběžných výpočtů a s letovými měřeními reálného letounu.

Součástí práce je i doporučené hardwarové vybavení potřebné pro fyzické dokončení simulátoru. Navržené konfigurace jsou rozděleny do tří cenových kategorií.



Obr. 1-1 Virtuální model letounu VUT-061 TURBO v simulátoru X-Plane.





## 2 KOMERČNÍ LETECKÉ SIMULÁTORY

---

Komerční letecký simulátor je software, schopný simulovat geografické prostředí planety Země. V prostředí tohoto simulátoru je uživateli umožněno ovládat matematické modely letadel, které mohou mít plně funkční 3D pilotní kabinu se všemi funkcemi potřebnými k ovládání a řízení letadla. Snahou je, aby byl matematický model co nejbližší reálnému chování letounu.

Odlétané hodiny v prostředí těchto softwarů nejsou využitelné pro výcvik pilotů, nejsou-li součástí certifikovaného výcvikového zařízení. Přesto je možné tyto simulátory použít pro zvyšování schopností pilotů, nácvik řešení obtížných situací, či k seznámení se systémy letounu.

Simulátory dále umožňují zobrazovat přesný model Země, včetně přesných výškových dat reliéfu povrchu Země a vodních ploch, simulovat počasí včetně proudění vzduchu, teplotních hladin, srážek nebo tlakových hladin, simulovat reálné venkovní osvětlení v závislosti na denní době a datu. Dále pak umožňují simulaci leteckého provozu, přístrojových přistání a interaktivních simulací řízení leteckého provozu.

Předními komerčními leteckými simulátory jsou Microsoft Flight Simulator, X-Plane 10, Prepar3D a v poslední řadě open-source simulátor FlightGear. Vzhledem k různým způsobům definování vlastního modelu letadla v jednotlivých simulátorech byl jako nejvhodnější zvolen simulátor X-Plane. Jeho přednosti jsou blíže popsány v kapitole 2.4.



Obr. 2-1 Ukázka VUT-061 Turbo v simulátoru X-Plane 10.

## 2.1 Microsoft Flight Simulator [20]

Microsoft Flight Simulator je letecký simulátor vytvořený pro operační systém Windows. Tvůrcem tohoto simulátoru je Bruce Artwick, který jej v roce 1982 uvedl na trh pod ochrannou známkou firmy Microsoft a v následujících dvou desetiletích se stal nejpoužívanějším komerčním simulátorem na světě. V roce 2006 byla vydána nejaktuálnější verze simulátoru, Flight Simulator X (dále jen FSX).

## 2.2 Microsoft ESP™ [3]

V roce 2008 vydala firma Microsoft nový produkt: Microsoft ESP™ (dále jen ESP), což byla platforma založená na stejné technologii jako FSX, která však zároveň umožňovala používat simulátor i pro výcvikové a vzdělávací účely. Platforma ESP měla umožňovat výcvikovým organizacím libovolně dotvořit specifické situace a řešení.

V roce 2008 Microsoft oznámil uzavření firmy Aces Studio, která vyvíjela FSX i ESP, a veškerý vývoj těchto simulátorů byl ze strany Microsoftu ukončen[19].

### 2.2.1 Matematicko-fyzikální model v Microsoft ESP™ [14]

Microsoft Flight Simulator X i Microsoft ESP™ k výpočtu simulace letu využívají aerodynamické stabilitní a říditelnostní derivace (dále jen derivace). Při vývoji modelu letadla jsou používány soubory AIR, ve kterých musí být uvedena všechna aerodynamická data modelu ve formě hodnot derivací, koeficientů a tabulek konkrétního letadla. Tato data jsou následně použita k výpočtu vlastností letadla.

K vytvoření nového letového modelu je zapotřebí použít vzorový soubor AIR (viz příloha 2), který je následně upraven podle dostupných dat. Pro přesné definování dynamického modelu letounu je do AIR souboru nutné zadat minimálně následující údaje:

- Součinitel vztlaku
- Součinitel odporu
- Součinitel stoupání
- Součinitel klopení
- Součinitel klonění
- Součinitel bočení
- Derivace součinitele vztlaku dle úhlu náběhu
- Derivace součinitele klopivého momentu dle úhlu náběhu

Nepřesné či neúplné zadání požadovaných hodnot vede k nepřesnému chování letadla. Při tvorbě modelů letadel pro FSX či ESP je tedy zapotřebí znát hodnoty všech derivací předem, což bývá problém. „Pro odhad těchto derivací se využívají příručkové metody, například DATCOM [24] založené na kombinaci výpočtů a odečítání dat z empiricky stanovených diagramů. Další možností je využití panelových metod VLM Vortex-Lattice Method [22] založených na teorii potencionálního proudění. Dále je možné stanovit aerodynamické bezrozměrné derivace pomocí CFD metod, měřením v aerodynamickém tunelu nebo letovými zkouškami. Přesnost jednotlivých metod se odvíjí od náročnosti na výpočet či realizaci

zkoušky. Porovnání jednotlivých metod pro stanovení stabilitních a říditelnostních derivací bylo provedeno na VZLU viz [22]. Z jejich výzkumu vyplynuly následující závěry.

Standardní příručkové metody jsou v dnešní době nejpoužívanější pro předběžný odhad derivací. V kombinaci s vhodným softwarem (například AAA, Digital DATCOM) jsou rychlou a relativně jednoduchou metodou pro odhad derivací. Nevýhodou může být nedostatečná přesnost odhadů u některých derivací.

Panelové metody založené na teorii potenciálního pole jsou relativně přesnou a rychlou metodou stanovení derivací, nevýhodou však je omezený rozsah úhlů náběhu, při kterých jsou derivace reálné. Na tomto základě je založen software AVL, TORNADO.

CFD metody postihují výpočty v nelineární oblasti a zahrnují vliv vazkosti. Z těchto důvodů poskytují velmi kvalitní výsledky, a to i v oblastech vysokých úhlů náběhu. Problémem těchto metod je však vysoká časová náročnost, a proto se používá v pozdějších stádiích návrhu.“ [11]

Odhady derivací tedy neprovádí sám simulátor, nýbrž je nutné získat je jiným způsobem a následně přímo zadat do souboru AIR. Tím je vývoj letadel pro simulátory používající metodu aerodynamických stabilitních a říditelnostních derivací velmi náročný a zároveň neumožňuje rychlé experimentální testování nových designů letadla.

## **2.3 Prepar3D: Lockheed Martin[16]**

Prepar3D (dále jen P3D) je letecký simulátor, který vyvinula americká společnost Lockheed Martin. Lockheed Martin je jedna z hlavních mezinárodních společností s pokročilou technologií, letecký výrobce, a jeden z největších vojenských dodavatelů na světě.

Simulátor byl vyvinut v roce 2010 jako vzdělávací platforma pro civilní, ale také vojenské vzdělávací účely. P3D je založen na technologii ESP™ od firmy Microsoft®, podobně jako FSX. Vývoj letadel tedy probíhá obdobně jako u předchozích simulátorů. Nejaktuálnější verze simulátoru je P3D 3.2.

## **2.4 FlightGear [8]**

FlightGear je open-source simulátor. To znamená, že není vyvíjen jednou firmou, nýbrž kýmoli, kdo je ochoten se na vývoji dobrovolně podílet. Prvotní myšlenka projektu byla vytvořit letecký simulátor, který by bylo možné používat jak pro soukromé, tak akademické účely, přičemž výhodou simulátoru jsou neomezené možnosti dalšího vývoje. Vývoj je závislý pouze na schopnostech jednotlivců, kteří se na projektu podílí. Jádrem simulátoru je JSBSim [9], což je open-source nástroj používaný k výpočtu aerodynamického modelu letadel. Zdrojové kódy simulátoru i JSBSim jsou volně přístupné na internetu.

FlightGear je často využíván různými institucemi a univerzitami po celém světě [17]. Místo JSBSim pak jednotlivé instituce používají většinou svoje vlastní výpočtové softwary a samotný FlightGear je používán pro zobrazení prostředí, ve kterém se letouny pohybují.

Další výhodou FlightGearu, kvůli které je simulátor často využíván, je možnost propojení simulátoru se softwarem MATLAB.

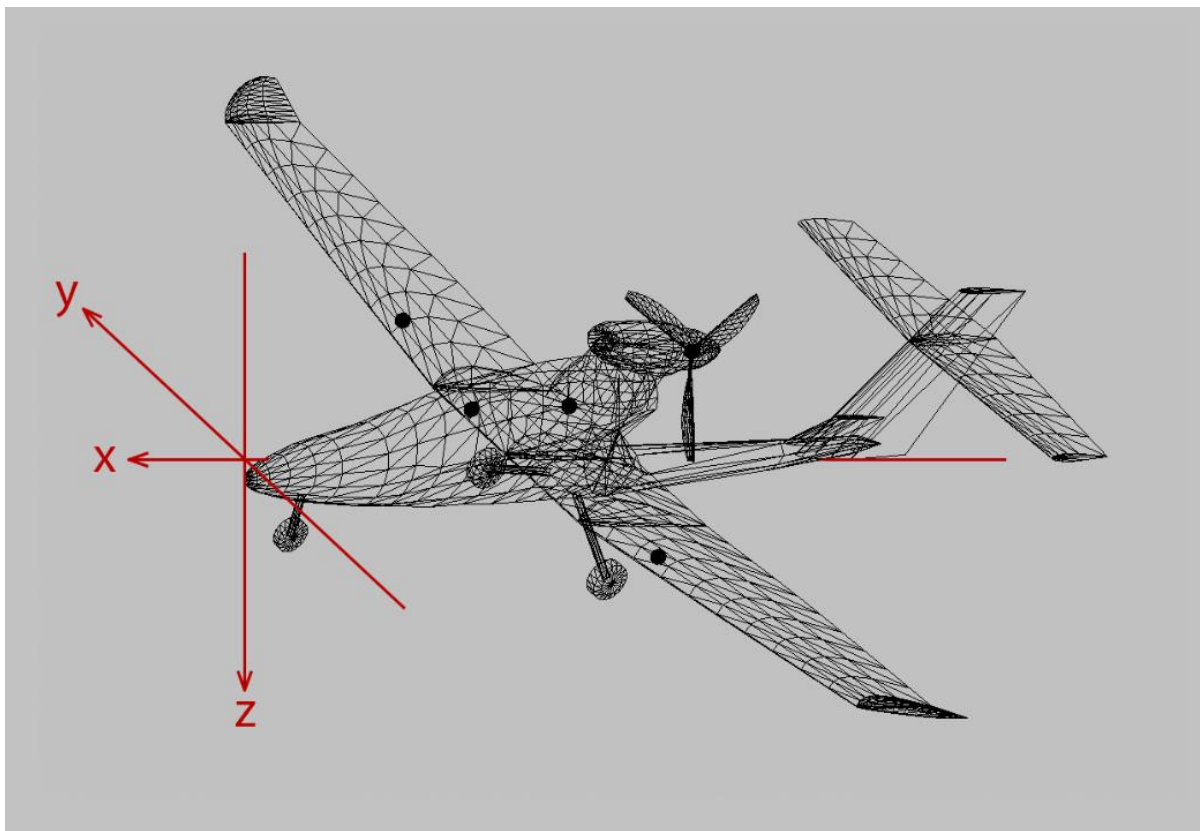
## 2.5 X-Plane 10 [7]

X-Plane 10™ (dále jen X-Plane) je letecký simulátor, vyvíjený firmou Laminar Research z Jižní Karolíny ve Spojených státech Amerických.

Hlavní rozdíl, kterým se X-Plane odlišuje od všech ostatních simulátorů na trhu, spočívá v samotném jádru simulátoru. X-Plane jako jediný používá k simulaci letu matematickou metodu Blade element theory (dále jen BET). S touto metodou přišli William Froude, David W. Taylor a Stefan Drzewiecki, a prvotně byla určena pro predikci chování vrtulí. BET spočívá v rozkladu částí geometrického modelu letadla na malé elementy a v následném vyhodnocení silového působení na každý element zvlášť. Tento proces se opakuje několikrát za vteřinu. Silová působení jsou následně převedena na zrychlení a ta jsou integrována na rychlosti a polohy jednotlivých elementů.

### 2.5.1 Rozklad geometrického modelu

Rozklad probíhá pouze jednou, během inicializace a načítání modelu do prostředí simulátoru. X-Plane rozloží křídla, křídélka, výškové kormidlo, směrové kormidlo a vrtuli na konečný počet elementů ve tvaru trojúhelníků (obr. 2-2). Maximální počet na jednu část je 200.



Obr. 2-2 3D virtuální model letounu VUT-061 TURBO v programu Plane-maker. Zobrazeny jsou elementy, na kterých je použita metoda BET.

### 2.5.2 Určení rychlosti

K nalezení vektoru rychlosti každého elementu jsou potřeba rychlost, úhlová rychlost a poloha elementu vzhledem k počátku souřadnic celého letounu. Při výpočtu vektoru rychlosti je také brán v potaz úhel zešikmení proudu vzduchu, ovlivnění vrtulovým proudem, úhel náběhu a vztaková mechanizace.

Ovlivnění vrtulovým proudem je určeno velikostí plochy každého listu vrtule a tahem vrtule. S ohledem na lokální hustotu vzduchu je určeno ovlivnění, potřebné pro zachování hybnosti.

Úhel zešikmení proudu vzduchu je určen v závislosti na štíhlosti, šípovitosti křídla, poměru mezi hloubkou a délkou křídla a horizontální a vertikální vzdáleností mezi stabilizátorem a křídly. Následně je z tabulkových hodnot určen úhel zešikmení, závisující na součiniteli vztlaku.

### 2.5.3 Stanovení součinitelů

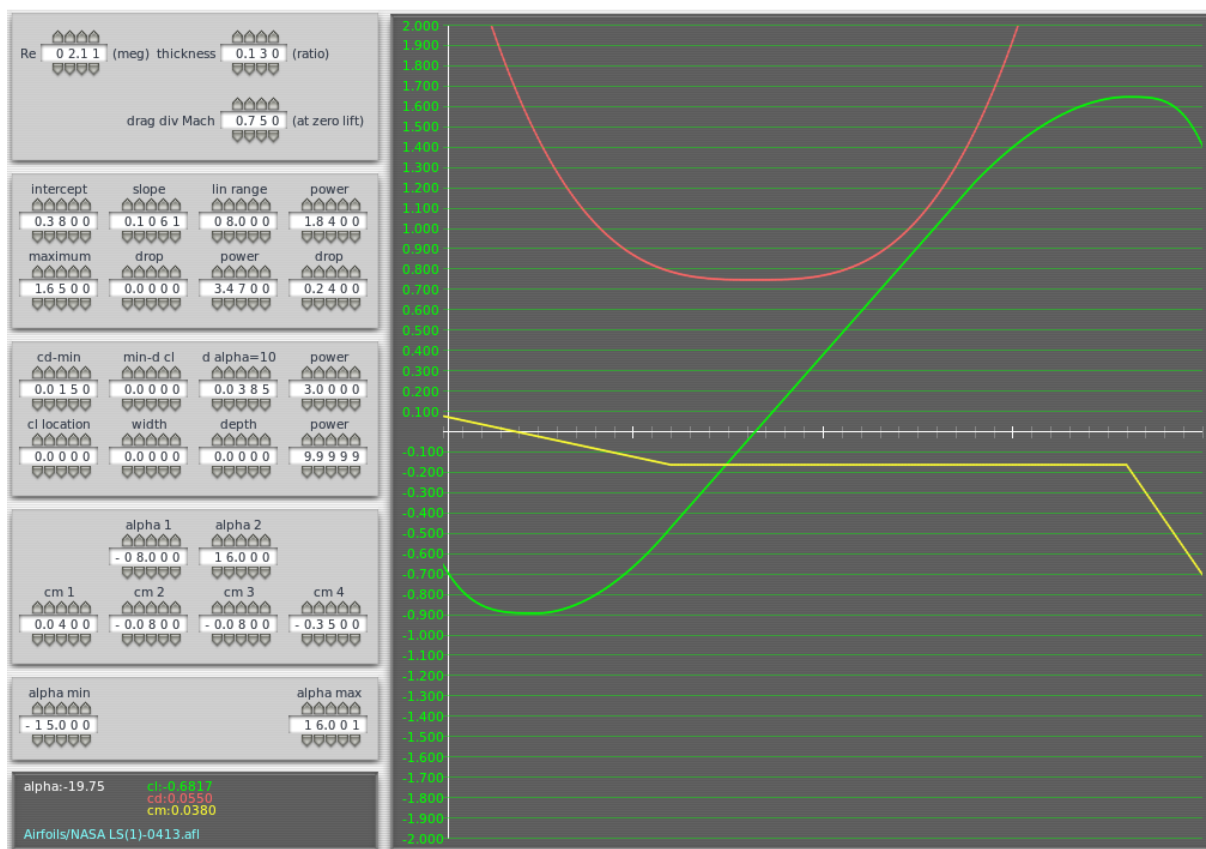
Data profilu křídla, vkládaná v programu Airfoil-Maker (blíže popsáném v kapitole 2.5.5), jsou dvoudimensionální. X-Plane proto při výpočtu sklonu vztakové čáry, maximálního součinitele vztlaku, indukovaného odporu a součinitele momentu křídla konečného rozpětí zohledňuje vliv štíhlosti, zúžení a šípu křídla (horizontálního, vertikálního stabilizátoru nebo vrtule, podle toho, jaká část je počítána). Pro určení vlivu stlačitelnosti je používána Prandtl-Gluertova metoda. Transonické efekty nejsou simulovány, je zohledněno pouze empirické zvýšení odporu na základě Machova čísla divergence. X-Plane umožňuje také zjednodušený výpočet supersonického proudění.

### 2.5.4 Výslednice sil

Výslednice sil celého letounu jsou určeny pomocí elementů definovaných v bodě 2.4.1, součinitelů nalezených v bodě 2.4.3 a dynamických tlaků, určených pro každý element zvlášť na základě rychlosti, výšky, teploty, úhlu zešikmení proudu vzduchu a ovlivnění vrtulovým proudem. Výsledné síly jsou následně poděleny hmotností letounu pro získání zrychlení a momentem setrvačnosti pro získání úhlového zrychlení. Celý proces od bodu 2.4.2 se neustále opakuje nejméně patnáctkrát za vteřinu.

### 2.5.5 Definice profilu křídla v programu Airfoil-Maker

Pro správné určení profilu křídla je třeba použít programu Airfoil-maker, který je také součástí instalační složky X-Plane 10. Tento program umožní vytvářet či měnit různé parametry profilů křídel (obr. 2-3) a tyto parametry následně uložit do souboru formátu .afl. Dále je v programu Plane-Maker určen specifický profil u kořene a konce každé části křídla. X-Plane v závislosti na Reynoldsově čísle pomocí interpolace dopočítá zbývající hodnoty po délce křídla, a v závislosti na zadaných hodnotách je přepočítán okamžitý vztlak, odpor a moment. Průběh součinitelů v režimu odtržení je zjednodušený.



Obr. 2-3 V programu Airfoil-Maker je možné specifikovat mnohé parametry.

## 2.5.6 Plane-Maker [15]

Oproti ostatním simulátorům je v X-Plane definování virtuálního modelu výrazně usnadněno, a to díky programu Plane-Maker, který je také součástí simulátoru X-Plane. Namísto psaní kódu jsou totiž všechny parametry a fyzikální vlastnosti (např. váha, parametry motoru, geometrie letounu, řídicí plochy na křídlech atd.) zadány přímo v prostředí programu. Ten následně sám vygeneruje výsledný textový soubor ve formátu .acf s kódem letounu, který je možné otevřít v simulátoru, či dále upravovat.

## 2.5.7 Získání letových dat

X-Plane obsahuje funkci, která umožňuje zobrazení požadovaných dat a následný zápis dat do souboru (viz příloha 4). Tuto funkci je možné aktivovat přímo v prostředí simulátoru přes menu „Data Input & Output“, ve kterém si uživatel určí, která data budou zobrazena v aktivním okně simulátoru a která budou zapsána do souboru. X-Plane následně, až desetkrát za vteřinu, automaticky zapisuje okamžité hodnoty vybraných dat do textového souboru.

## 2.5.8 Rozšíření X-Plane prostřednictvím pluginů

Simulátor X-Plane je sám o sobě otevřená platforma, která umožňuje přidávat jakékoli funkce pomocí doprogramovaných modulů, tzv. pluginů. Tyto pluginy umožňují rozšířit funkce simulátoru jakýmkoli způsobem. Možnosti jsou omezeny pouze kreativitou a schopnostmi programátora. Hlavním jazykem pro programování těchto doplňků je C/C++. Je však možné použít i další alternativy jako např. Python či LUA.

### 3 LETOUN VUT-061 TURBO

---

Experimentální letoun VUT-061 TURBO byl vyvinut První brněnskou strojírnou a Leteckým ústavem Fakulty strojního inženýrství VUT Brno ve spolupráci se společnostmi JIHLAVAN airplanes s.r.o. a Air Jihlava-service. Účelem tohoto letounu je testování turbovrtulové pohonné jednotky TP 100 s tlačnou vrtulí. [25]

#### 3.1 Popis letounu [10]

Letoun je jednomístný středoplošník smíšené konstrukce s tandemovým uspořádáním sedadel. Prostor pro zadní sedadlo je však určen pro měřicí ústřednu. Podvozek je pevný, příďového typu, s řízeným příďovým kolem. Ocasní plochy jsou uspořádány do kříže.

Konstrukce trupu a svislé ocasní plochy jsou kompozitní, křídla a vodorovné ocasní plochy jsou celokovové. Křídlo je tvořeno obdélníkovým centroplánem a lichoběžníkovými vnějšími částmi křídla s pevnými winglety. Pohon letounu tvoří turbovrtulový motor se stavitelnou vrtulí v tlačném uspořádání.

##### 3.1.1 Rozměry letounu

Rozpětí:	9,945 m
Délka:	8,003 m
Výška:	2,545 m

##### 3.1.2 Hmotnosti

Max. vzletová hmotnost:	650 kg
Hmotnost prázdného letounu:	473 kg

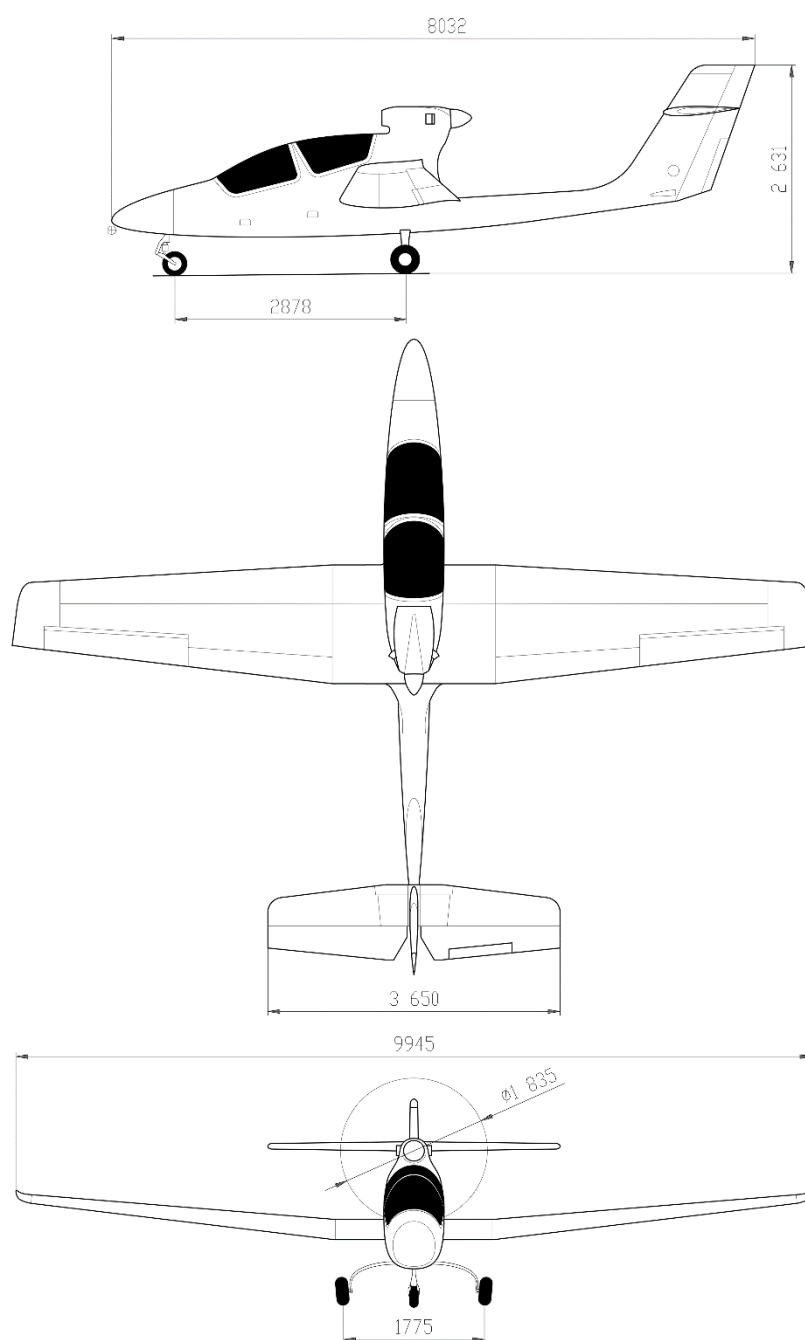
##### 3.1.3 Pohonná soustava

Turbovrtulový motor:	TP100
Maximální výkon	
- vzletový:	180 kW
- trvalý:	160 kW
- cestovní:	140 kW

##### 3.1.4 Vrtule

Typ:	AV723, 3-listá, tlačná
Průměr vrtule:	1 830 mm

### 3.1.5 Třípohledový výkres



Obr. 3-1 Výkres VUT-061 TURBO (rozměry v milimetrech) [10].

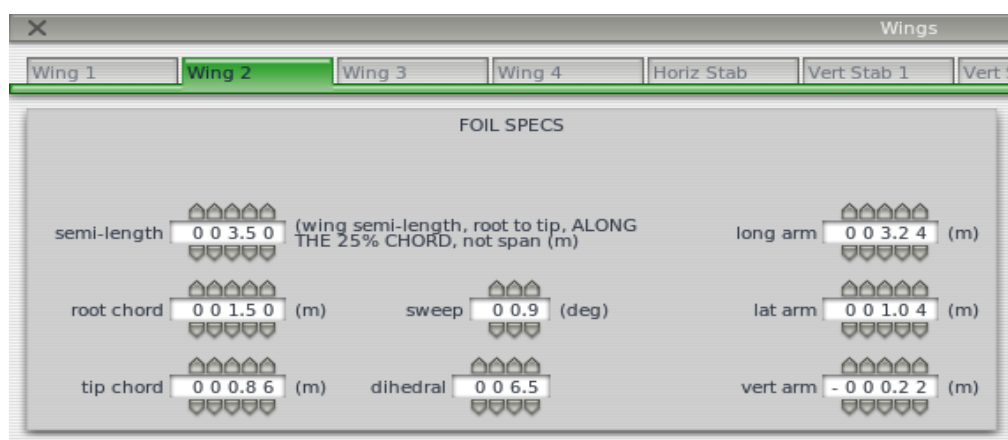


## 4 VÝVOJ FYZIKÁLNÍHO MODELU

Aerodynamický model vznikl pouze na základě geometrie letounu, aerodynamických charakteristik profilů křídel a součiniteli odporu trupu, převzatém z aerostatických podkladů [6]. Charakteristiky motoru byly získány převážně z letové příručky letounu [10]. Seznam všech použitých vstupních parametrů je v kapitole 4.2.

Virtuální model letounu byl vytvořen převážně pomocí programů Plane-Maker a Airfoil-Maker. Postup vývoje lze shrnout do následujících bodů:

1. Vymodelování trupu letounu podle referenční výkresové dokumentace na základě 3D modelu z programu CATIA.
2. Vytvoření křídel, vodorovných a svislých ocasních ploch.
3. Vytvoření sekundárních částí letadla, např. kryt motoru či podvozky.
4. Nastavení systémů a vnitřních vlastností, včetně parametrů motoru, váhy a centráže letounu, nebo např. specifikace palivové soustavy.
5. Přiřazení dodatečných funkcí a speciálních vlastností.
6. Vytvoření 2D nebo 3D panelu obsahujícího všechny přístroje a řídicí ovládací prvky, které uživateli umožňují řízení letadla při všech letových režimech.
7. Vytvoření grafického modelu pomocí grafických softwarů a 3D modelářů.



Obr. 4-1 Definování rozměrů části křídla v programu Plane-Maker.

### 4.1 Zjednodušení

Při vývoji modelu bylo zapotřebí učinit různá zjednodušení a zanedbání. Důvodem bylo, že program Plane-Maker neumožňuje zadat některé parametry, nebo naopak umožňuje stanovit parametry, jejichž hodnoty nebylo možné dohledat či získat. Většinou se jednalo o velice specifické parametry, které by bylo nutné získat přímo od výrobců jednotlivých součástí letounu.

Mnoho parametrů v programu Plane-Maker bylo při definování modelu ponecháno na výchozí hodnotě. Ve všech případech se jednalo o parametry, které nijak neovlivňovaly

letové vlastnosti letounu a vzhledem k cílům práce je nebylo nutné zadávat či konkrétně specifikovat.

Další z parametrů, které lze pro model definovat jsou síly v řízení při daných režimech letu. Vzhledem k nedostatku zařízení, která by nám umožnila těchto funkcí využít, nebyly síly v řízení definovány.

## 4.2 Seznam hodnot použitých při tvorbě modelu

Při vývoji virtuálního modelu letounu bylo zapotřebí zadat co největší množství dostupných parametrů reálného letounu:

Parametr	Hodnota	Zdroj
<b>Motor a vrtule:</b>		[10]
Typ motoru	Turbovrtulový	
Typ vrtule	Vrtule stálých otáček	
Výkon motoru (MTV/MVV)	160/180 kW	
Otáčky vrtule	2158 min <sup>-1</sup>	
Průměr vrtule	1830 mm	
Volnoběh	53,1 % N1	
<b>Rozměry letounu:</b>		[10]
Rozpětí	9945 mm	
Délka	8003 mm	
Výška	2545 mm	
<b>Křídlo:</b>		[10]
Rozpětí křídel	9945 mm	
Štíhlost	7,78 [-]	
Zúžení	0,552 [-]	
Rozpětí vztlakové klapky	1800 mm	
Poměrná hloubka klapky	29 %	
Rozpětí křídélka	1800 mm	
Poměrná hloubka křídélka	30 %	
Profil kořene křídla	NASA LS(1)-0417	[10]
Profil konce křídla	NASA LS(1)-0413	[10]
<b>Trup:</b>		[10]
Délka	6836 mm	
Výška	1643 mm	
Šířka	754 mm	

Parametr	Hodnota	Zdroj
Součinitel odporu trupu vztažený k ploše čelního průřezu	0.316 [-]	[6]
<b>Vodorovné ocasní plochy:</b>		[10]
Rozpětí	3650 mm	
Plocha	2,942 m <sup>2</sup>	
Plocha VK	1,222 m <sup>2</sup>	
<b>Svislé ocasní plochy:</b>		[10]
Výška	1570 mm	
Plocha	1,562 m <sup>2</sup>	
Plocha SK	0,559 m <sup>2</sup>	
<b>Podvozek:</b>		[10]
Rozchod	1775 mm	
Rozvor	2878 mm	
<b>Výchyly řídicích ploch:</b>		[10]
Křídélko	24° nahoru, 16° dolů	
Výškové kormidlo	30° nahoru, 25° dolů	
Směrové kormidlo	± 30°	
Vztlakové klapky	0°, 10° (vzlet), 35° (přistání)	
<b>Hmotnosti a těžiště:</b>		[23]
Hmotnost prázdného letounu	474,2 kg	
Max. vzletová hmotnost	650 kg	
Hmotnost paliva	144 kg	
Poloha těžiště na ose x od počátku souřadného systému letounu*	3264,9 mm	
Poloha těžiště na ose z od počátku souřadného systému letounu	260 mm	

\*Pro určení těžiště byla brána konfigurace „11“ Pilot (95kg)+max palivo, 10kg aparatura.

### 4.3 Vytvoření grafického modelu

Ke grafickému zobrazení letounu v prostředí simulátoru je možné použít samotný matematicko-fyzikální model letounu, vytvořený v modeláři programu Plane-Maker. Práce v tomto modeláři je však velice obtížná a kvůli omezenému počtu uzlů sítě modelu je vzhled

modelu nedokonalý. Navíc tento modelář neumožňuje importovat žádné soubory formátů STEP či jiných formátů z CAD modelářů.

V programu Plane-Maker je však možné skrýt všechny části matematicko-fyzikálního modelu a přiřadit letounu separátní 3D model ve formátu OBJ, který slouží pouze pro grafické účely a na chování letounu nemá žádný vliv. Tento 3D model je možné vytvořit v jakémkoli 3D modeláři, který je schopen exportovat soubory ve formátu OBJ. Tomuto modelu je dále nutné v grafickém softwaru vytvořit i textury.

#### **4.4 Vývoj virtuální 3D kabiny**

Aby bylo možné ovládat letoun v prostředí simulátoru, bylo zapotřebí vytvořit i přední pilotní prostor kabiny obsahující všechny přístroje potřebné k řízení letounu. Existují dvě možnosti, jak kabinu vytvořit. Jedná se o tzv. „2D cockpit“ či „3D cockpit“. V případě tohoto modelu letounu byla zvolena varianta „3D cockpit“, kdy je kabina vymodelována jako 3D model. Jedná se o stejnou metodu, která je popsána v podkapitole 4.3. Všechny přístroje našeho letounu bylo tedy třeba vymodelovat v 3D modeláři. Pro tento účel byl zvolen program AC3D, který obsahuje plugin umožňující přiřazovat jednotlivým částem 3D modelu konkrétní funkce či jednotlivé části animovat (např. ručičky přístrojů, vztlakové klapky na křídlech apod.)

Alternativou by bylo použít 2D kabinu, která by byla kompletně vytvořena v prostředí programu Plane-Maker. V takovém případě by byla přístrojová deska v simulátoru zobrazena pouze dvoudimenzionálně.

Přístroje vytvořené pro tento model byly:

1. Rychloměr LUN 116.D0B2
2. Výškoměr Winter 4FGH40
3. Display TL 6724 obsahující indikátor parametrů motoru
4. Variometr Winter 5461
5. Kompas LUN 1221-6
6. Sklonoměr Winter No1120
7. Páka ovládání klapek



Obr. 4-2 Pohled pilota na přístrojovou desku.

#### 4.5 Časový rozsah vývoje virtuálního modelu

Ačkoli je díky programu Plane-Maker proces vytváření virtuálního modelu letounu výrazně usnadněn, celkový čas vývoje letounu trval stovky hodin. V tab. 4-1 je odhad hodin strávených na jednotlivých fázích vývoje.

Tab. 4-1 Časové rozdělení vývoje modelu.

Fáze vývoje	Přibližný počet hodin
Vymodelování celého letounu v programu Plane-Maker včetně trupu, křídel a všech řídicích ploch.	60
Přiřazení odpovídajících fyzikálních vlastností modelu	30
Nastavení systémů a vnitřních vlastností	20
Přiřazení dodatečných funkcí a speciálních vlastností.	10
Vytvoření přístroje desky	80
Vytvoření grafického modelu pomocí grafických softwarů a 3D modelářů.	120
Přibližná celková doba vývoje	320

## 5 SROVNÁNÍ VÝKONŮ MODELU LETOUNU V X-PLANE S LETOVÝM MĚŘENÍM

Nad rámec zadání práce bylo provedeno srovnání výkonů letounu s měřeními na reálném letounu. Toto srovnání nám umožnilo vytvořit si představu o využitelnosti simulátoru X-Plane pro řešení různých inženýrských problémů v letectví. Důležitou skutečností je, že model nebyl na základě dat z letových měření dále nijak upravován.

Prvním úkolem měření bylo zjistit pádovou rychlost při cestovní konfiguraci, maximální rychlost letounu při cestovní konfiguraci a dále stoupací rychlosti letounu získané pilovými lety. Všechna měření probíhala v podmínkách mezinárodní standardní atmosféry.

Data z měření byla získána metodou popsanou v kapitole 2.5.7.

### 5.1 Pádové rychlosti

#### Podmínky měření:

Konfigurace letounu: cestovní – vztlakové klapky zasunuty

Režim motoru: volnoběh – 53,1% N1

Pracovní výška:  $H_P = 945\text{m}$

Pádová rychlost:

$$V_{S1} = \sqrt{\frac{2 \cdot L}{S \cdot C_{Lmax} \cdot \rho_0}} \quad (5.1)$$

Tab. 5-1 Hodnoty pádových rychlostí získané v X-Plane a z letových měření.

Konfigurace	Režim motoru	Pádová rychlost, X- Plane $V_{S1}$ (km/h)	Pádová rychlost, letová měření $V_{S1}$ (km/h)
Cestovní	Volnoběh	84	82

### 5.2 Maximální rychlost

V tabulce níže je uvedeno porovnání hodnot získaných z X-Plane s hodnotami reálných měření. Rozdíl mezi maximální rychlostí v X-Plane a reálným měřením je 9 km/h.

#### Podmínky měření:

Konfigurace letounu: cestovní – vztlakové klapky zasunuty

Režim motoru: maximální trvalý – 99,9 % N1

Pracovní výška:  $H_P = 1370\text{ m}$

Tab. 5-2 Porovnání maximálních rychlostí.

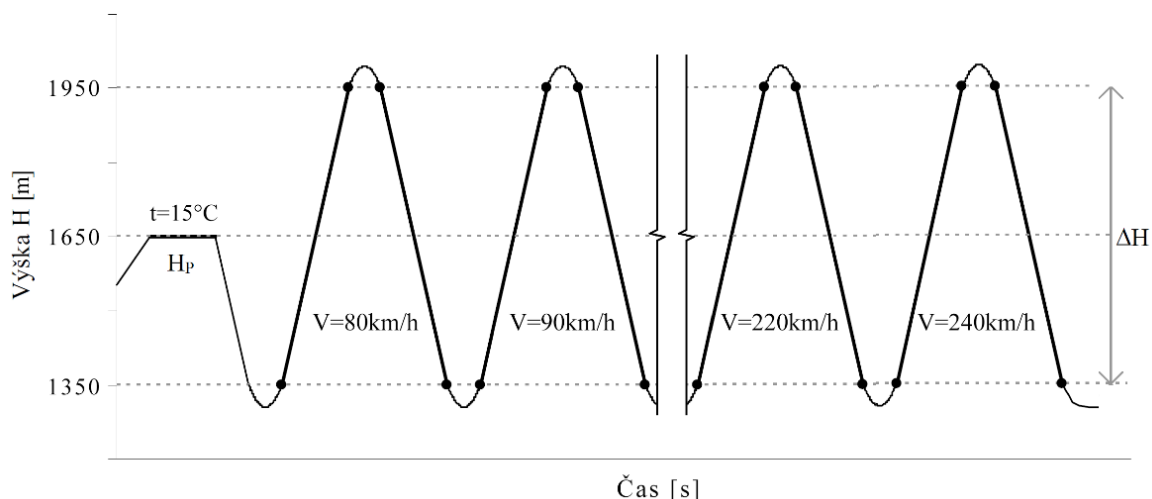
Měření	Maximální rychlost $V_{TAS}$ [km/h]
Měření v X-Plane	264
Reálné měření	275

### 5.3 Pilové lety

Další testování probíhalo formou pilových letů, při kterých byly sledovány vertikální rychlosti letounu a součinitelé vztlaku a odporu. Lety byly prováděny pro jednotlivé rychlosti od  $V_{S1}$  do  $V_{NO}$  s krokem  $20 \text{ km.h}^{-1}$ .

#### Podmínky měření:

Konfigurace letounu: cestovní – vztlakové klapky zasunuty  
 Režim motoru: při stoupání: cestovní – 99,9 % N1  
 při klesání: volnoběh – 53,1 % N1 (s vrtulí v praporu)  
 Pracovní výška:  $H_P = 1\,650 \text{ m}$   
 Výškový rozsah:  $\Delta H = 300 \text{ m}$



Obr. 5-1 Průběh testovacího letu.

#### 5.3.1 Postup měření pilových letů

Měření probíhalo při stoupání či klesání letounu mezi výškami cca 1500 – 1800 m. Sledované parametry byly zapisovány desetkrát za vteřinu do textového souboru. Sledovány byly následující parametry:

- Kalibrovaná rychlost letu ( $V_{CAS}$ )
- Rychlost stoupání ( $W$ )
- Tlaková výška ( $H$ )
- Okamžitá hmotnost letounu ( $m$ )
- Vztlaková síla ( $L$ )
- Odporová síla ( $D$ )

### 5.3.2 Aerodynamické charakteristiky virtuálního letounu

I když X-Plane umožňuje také výpis součinitele vztlaku  $C_L$  a součinitele odporu  $C_D$ , tyto hodnoty nebyly použity, protože byly z neznámého důvodu zkreslené. Pro hodnoty poláry získané přepočtem z výpisu vztlakové a odporové síly jsme použili následující rovnice:

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho_0 V_{CAS}^2 S \quad (5.2)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho_0 V_{CAS}^2 S \quad (5.3)$$

Z těchto rovnic jsme vyjádřili vztahy pro  $C_L$  a  $C_D$ :

$$C_L = \frac{2L}{V_{CAS}^2 \rho_0 S} \quad (5.4)$$

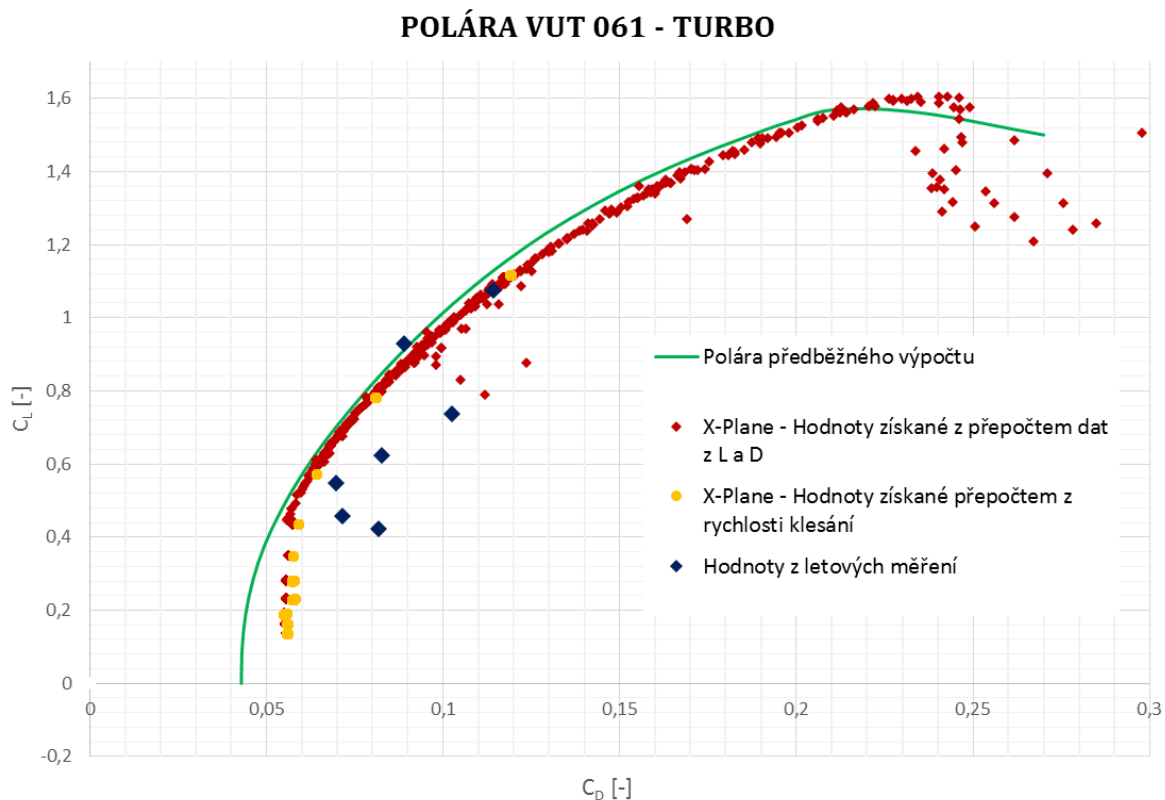
$$C_D = \frac{2D}{V_{CAS}^2 \rho_0 S} \quad (5.5)$$

Pro hodnoty poláry získané z pilových letů jsme použili následující rovnice:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{w}{V_{TAS}}\right) \quad (5.5)$$

$$C_L = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \cos(\gamma)}{\rho_0 \cdot V_{CAS} \cdot S} \quad (5.6)$$

$$C_D = -\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \sin(\gamma)}{\rho_0 \cdot V_{CAS} \cdot S} \quad (5.7)$$



Obr. 5-2 Porovnání poláry získané měřením v X-Plane s vypočtenou a změřenou polárou.

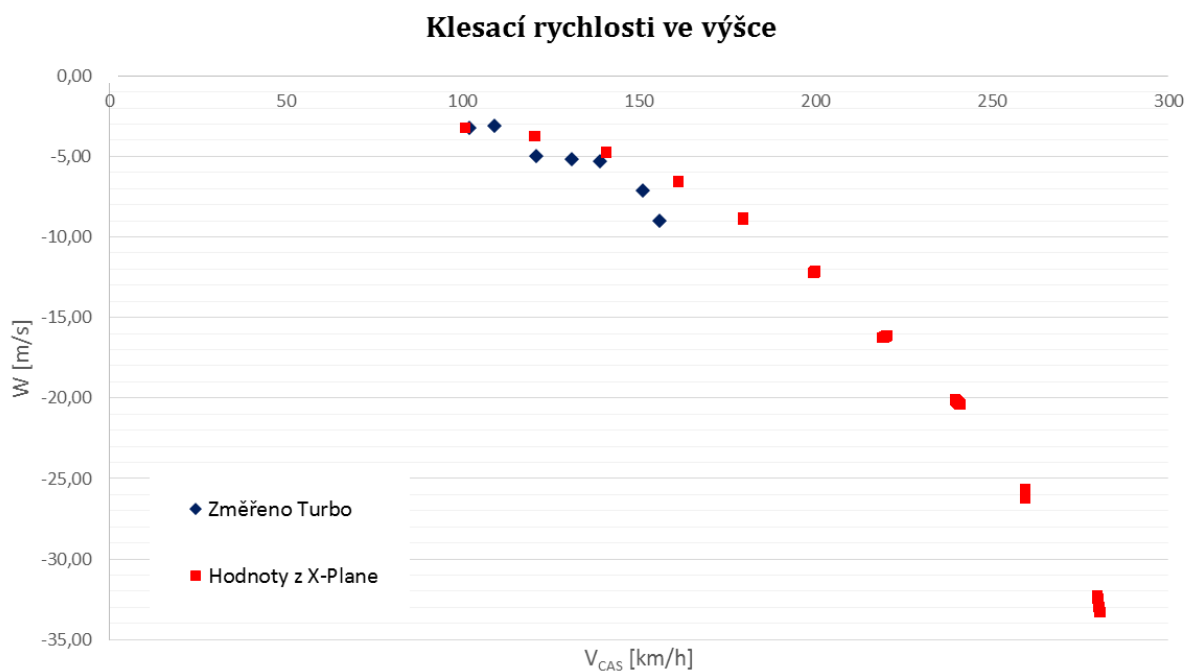


V obr. 5-2 je zakresleno porovnání získaných dat v X-Plane s letovými měřeními letounu a s hodnotami předběžného výpočtu. I přesto, že získaná polára predikuje nižší součinitel odporu než při reálných měřeních až do  $C_L=0,9$ . Nad  $C_L=0,9$  se polára blíží změřeným hodnotám. Dále je zřejmé, že polára virtuálního modelu téměř kopíruje průběh poláry vypočtené. Vypočtená polára zároveň nepostihuje lokální změny součinitele odporu určené měřeními. Letová měření nebyla prováděna při ideálních podmínkách a data proto mohou být do jisté míry zkreslena.

## 5.4 Klouzavý let

V obr. 5-3 je znázorněno porovnání klesacích rychlostí virtuálního modelu v porovnání s reálným letounem a předběžnými výpočty. Konfigurace letounu byla cestovní - se zasunutými vztlakovými klapkami. Režim motoru byl volnoběh s vrtulí v praporu.

Z grafu je zřejmé, že se výsledky se zvyšující rychlostí rozcházejí, ovšem kvůli nedostatku dat z letových měření je obtížné určit, jak moc se výsledky při vyšších rychlostech liší.



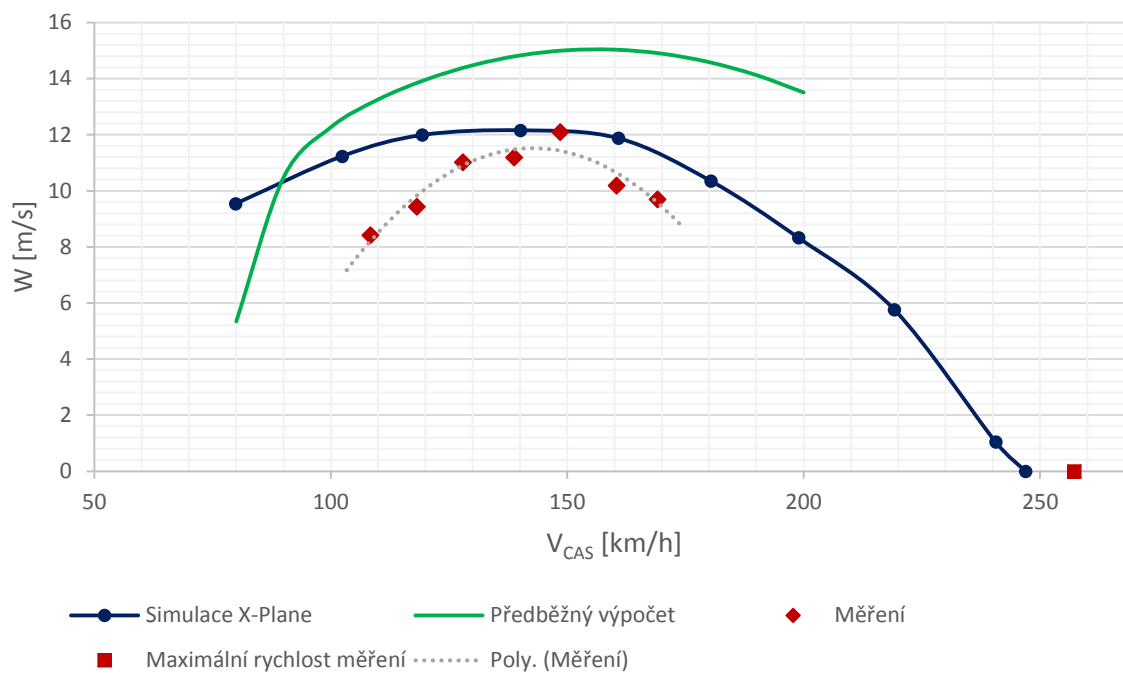
Obr. 5-3 Porovnání rychlostí klesání virtuálního modelu s letovými měřeními.

## 5.5 Stoupavý let

Níže je uvedené srovnání stoupacích rychlostí na základě letových měření virtuálního modelu, reálného letounu a předběžného výpočtu stoupacích rychlostí při maximálním trvalém výkonu motoru. Konfigurace letounu byla cestovní - se zasunutými vztlakovými klapkami, režim motoru byl 100% N1.

Z grafu je patrné, jak se výsledky rozcházejí při nižších rychlostech (větších úhlech náběhu). Nejvíce se přibližují při rychlostech 135 – 150  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , kdy se stoupací rychlost virtuálního a reálného letounu liší přibližně o  $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### Stoupací rychlosti ve výšce, klapky zataženy (režim motoru - maximální trvalý I)



Obr. 5-3 Porovnání stoupacích rychlostí v X-Plane s vypočtenými a změřenými hodnotami.

## 6 HARDWAROVÉ VYBAVENÍ SIMULÁTORU

K fyzickému dokončení simulátoru byly navrženy tři varianty podle cenových kategorií. Všechna doporučená příslušenství jsou kompatibilní se simulátorem X-Plane.

### 6.1 Varianta 1 (do 100 000 Kč)

Doporučuji uspořádání se třemi monitory pro výhled z pilotní kabiny a na přístrojovou desku, joystickem, pedály, zařízení TrackIR a ocelovou konstrukci se sedačkou (obr. 6-2), umožňující smontovat všechna příslušenství v jeden celek. V tab. 6-1 jsou uvedeny všechny navrhované komponenty i s přibližnými cenami. Schéma rozložení jednotlivých komponentů této varianty je na obr. 6-3.

#### Monitory

Doporučuji 3 monitory Samsung S27E500C o úhlopříčce 27“ se zakřiveným displejem a Full HD 1920x1080 rozlišením. Dále pak jeden menší monitor s dotykovým displejem, na kterém bude zobrazena přístrojová deska. V úvahu přichází ASUS VT168N o úhlopříčce 15.6".

#### VIZUALIZACE KONEČNÉHO ZOBRAZENÍ NA OBRAZOVKÁCH



Obr. 6-1 Ukázka navrhovaného zobrazení simulátoru na obrazovkách.

#### Joystick

Jako joystick byl vybrán Thrustmaster HOTAS WARTHOG. Joystick byl vyroben ve spolupráci s USAF pro trénink pilotů a je jedním z nekvalitnějších joysticků na trhu. Balení obsahuje i dvojitý ovladač plynu sloužící k nezávislé kontrole dvou motorů. Celá souprava obsahuje 51 funkčních tlačítek, kterým lze přiřadit libovolné funkce.

#### Pedály

Pro pedály byl vybrán produkt Saitek Pro Flight Rudder Pedals. Tyto pedály se třemi osami umožňují ovládání směru letu, stejně tak jako ovládání brzd. Zařízení disponuje mnoha

funkcemi a umožňuje nastavení opěrky nohou na velikost chodidla. Pomocí speciálního ovládacího prvku uprostřed lze nastavit různý odpor nožních pedálů.

### **TrackIR [21]**

TrackIR je zařízení, které výrazně zjednodušuje rozhlížení v prostoru kabiny. Infračervená kamera snímá polohu a orientaci hlavy pilota ve všech osách 3D prostoru a následně je posílá simulátoru. Ten na základě těchto dat neustále aktualizuje pohled uvnitř simulátoru, což by jinak uživatel musel dělat sám pomocí kloboučku HAT na joysticku či pomocí kláves na klávesnici.

### **VolairSim™ [2]**

Ocelová konstrukce od firmy VolairSim™ (obr. 6-2) umožňuje jednoduše připevnit monitory vedle sebe a spojit všechna potřebná hardwarová příslušenství do jednoho celku. Součástí konstrukce je i sportovní sedačka. Levnější alternativou by bylo tuto konstrukci vyrobit svépomocí.



Obr. 6-2 Ukázka konstrukce VolairSim™.

### **X-Plane 10 Professional-Use USB disk [12]**

Pro komerční či profesionální použití simulátoru X-Plane je zapotřebí dokoupit speciální USB disk, který umožní používat X-Plane v profesionálním režimu. Tato verze umožňuje používat další funkce X-Plane, jako například kontrolu snímkovací frekvence či spárování simulátoru

s reálnými GPS jednotkami Garmin. S tímto diskem je zároveň možné simulátor certifikovat na licenci FAA. Samotný simulátor X-Plane je třeba dokoupit zvlášť.

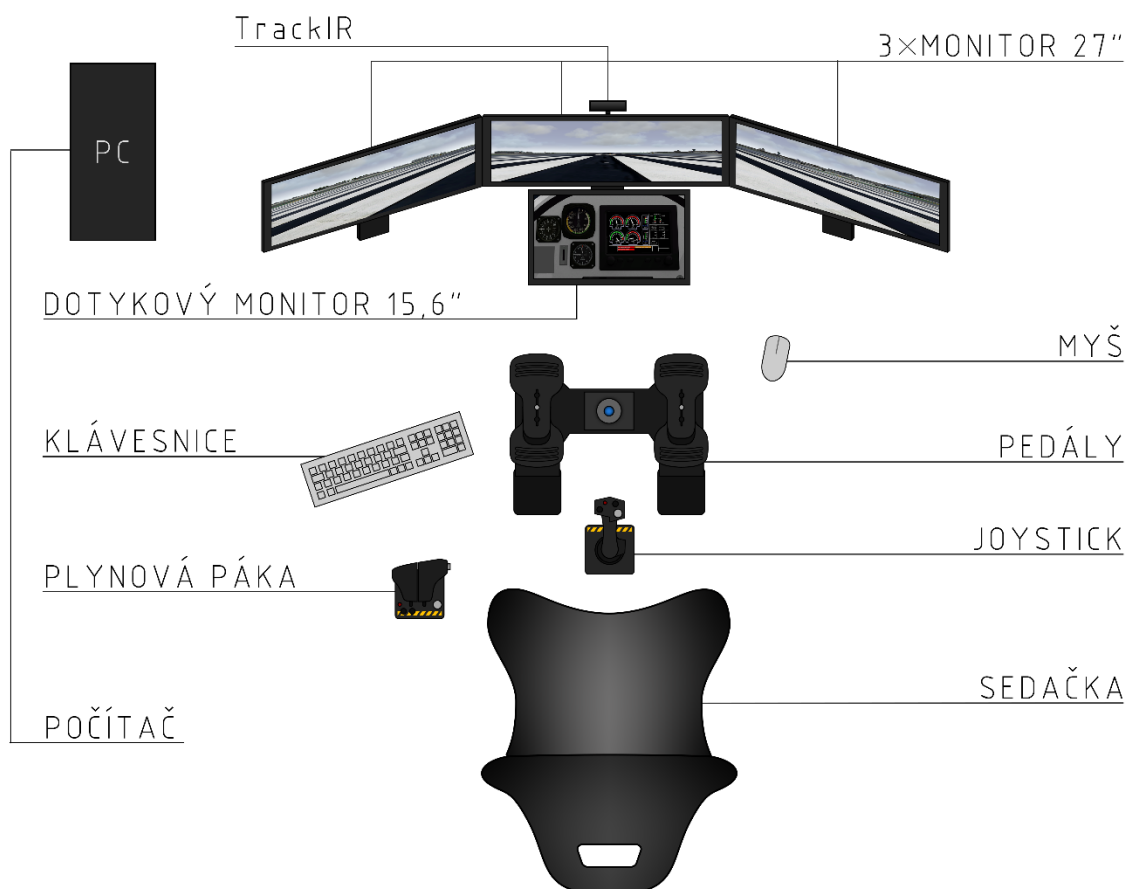
### Počítač

X-Plane neumožňuje zobrazit zároveň více různých pohledů, proto teoreticky není možné mít například na jednom monitoru zobrazen pohled vpřed a na druhém pohled na přístrojovou desku. Dané konfigurace však lze docílit spuštěním dvou kopií X-Plane zároveň. Hlavní kopie zobrazuje pohled ven z pilotní kabiny či pohled na letadlo a druhá kopie zobrazuje pouze přístrojovou desku.

Vzhledem k použití 4 monitorů a požadavku plynulého fungování simulátoru za všech okolností doporučuji následující parametry počítače:

- Čtyřjádrový procesor, 4 GHz
- Minimální paměť RAM 24 GB
- Grafická karta nVidia minimálně 4 GB VRAM (doporučuji GTX 980 Ti)
- 500 GB volného místa na disku
- zdroj 700 W

**Poznámka:** Grafické karty nVidia jsou lépe kompatibilní s X-Plane, proto se grafické karty značky AMD nedoporučují.



Obr. 6-3 Schéma rozložení příslušenství. Pro lepší přehlednost na obrázku není nosná ocelová konstrukce.

Tab. 6-1 Seznam jednotlivých položek simulátoru pro variantu 1.

Položka	Cena v Kč bez DPH
3×Samsung S27E500C	15843
ASUS VT168N	3297
PC sestava	33058
Thrustmaster HOTAS WARTHOG	7595
Saitek Pro Flight Rudder Pedals	3298
TrackIR	6600
Konstrukce VolairSim™	11653
X-Plane 10 Professional-Use ISB disk	14690
X-Plane 10	1570
<b>Celkem</b>	<b>97603</b>

## 6.2 Varianta 2 (do 50 000 Kč)

Tato varianta stále umožňuje použití simulátoru pro komerční použití, avšak některé komponenty byly odebrány či byly nahrazeny levnějšími produkty. V tab. 6-2 jsou uvedeny všechny navrhované komponenty i s přibližnými cenami a schéma rozložení jednotlivých komponentů varianty 2 je na obr. 6-4.

### Monitory

V této variantě byl ponechán pouze jeden monitor Samsung S27E500C. S úhlopříčkou 27“ stále umožňuje dostatečný výhled pro pilota.

### Joystick

Jako joystick byl vybrán Saitek X52 PRO Flight Controller. Balení obsahuje joystick a zároveň plynovou páku, která je opatřena LCD displejem a obsahuje 18 ovládacích prvků, kterým lze díky softwaru Saitek Smart Technology přiřadit libovolné funkce.

### Pedály

Vzhledem k nízké ceně a dobré kvalitě jsou i v této cenové variantě použity pedály Saitek Pro Flight Rudder Pedals.

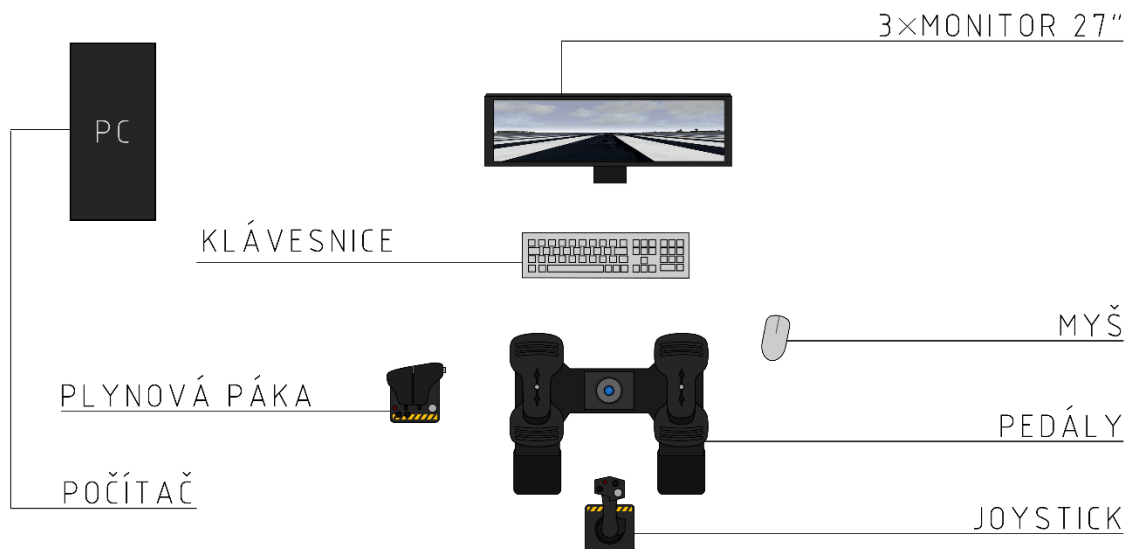
### Počítač

V tomto případě jsou již požadavky na počítačovou sestavu nižší. Díky použití pouze jednoho monitoru je možné ušetřit zejména pořízením levnější grafické karty a mírně slabším procesorem. Doporučuji následující parametry počítače:

- Čtyřjádrový procesor, 3,2 GHz nebo rychlejší
- Minimální paměť RAM 8 GB
- Grafická karta nVidia minimálně 4 GB VRAM
- 250 GB volného místa na disku
- zdroj 600 W

### X-Plane 10 Professional-Use USB disk [12]

Jak již bylo řečeno, pro komerční či profesionální použití simulátoru X-Plane je vždy zapotřebí k samotnému simulátoru dokoupit i speciální USB disk, který umožňuje používat X-Plane v profesionálním režimu. Tento produkt tedy nebylo možné odebrat.



Obr. 6-4 Schéma rozložení příslušenství střední cenové kategorie.

Tab. 6-2 Seznam jednotlivých položek simulátoru pro variantu 2.

Položka	Cena v Kč bez DPH
Samsung S27E500C	5281
PC sestava	20661
Saitek Pro Flight X55 Rhino H.O.T.A.S. System	4129
Saitek Pro Flight Rudder Pedals	3298
X-Plane 10 Professional-Use USB disk	14690
X-Plane 10	1570
<b>Celkem</b>	<b>49629</b>

### 6.3 Varianta 3 (do 10 000 – 30 000 Kč)

Tato varianta umožňuje používat simulátor pouze pro domácí použití. Cílem bylo získat nejnižší možnou cenu při současném zaručení plynulého chodu simulátoru.

#### Monitory

V této variantě byl vybrán jeden monitor Acer S242HLCbid s úhlopříčkou 24“.

#### Joystick

Jako joystick byl ponechán X52 PRO Flight Controller od firmy Saitek.

## Pedály

Vzhledem k nízké ceně a dobré kvalitě jsou i v této cenové variantě použity pedály Saitek Pro Flight Rudder Pedals.

## Počítač

Přestože je možné používat X-Plane i na počítačích s nižšími parametry než jsou doporučeny ve variantě 2, mohlo by se stát, že snímková frekvence simulátoru bude již příliš nízká a jakákoli práce se simulátorem bude velice obtížná. Z vlastní zkušenosti doporučuji i pro tuto variantu použít stejné či podobné parametry počítače jako v předchozí variantě, které i s velkým množstvím scénérií a s nastavením vysokého rozlišení zaručí bezproblémový chod simulátoru.

## X-Plane 10

V tomto případě je již dostačující koupit pouze simulátor X-Plane, který bude provozován v režimu HOME-USE VERSION.

V tab. 6-3 jsou uvedeny všechny navrhované komponenty i s přibližnými cenami. Výrazného snížení ceny by bylo možné dosáhnout použitím počítače a monitoru, které jsou již na LÚ k dispozici. Cena této konfigurace je v tab. 6-4.

Tab. 6-3 Seznam jednotlivých položek simulátoru pro variantu 3.

Položka	Cena v Kč bez DPH
24" Acer S242HLCbid	2884
PC sestava	20661
Saitek Pro Flight X55 Rhino H.O.T.A.S. System	4129
Saitek Pro Flight Rudder Pedals	3298
X-Plane 10	1570
<b>Celkem</b>	<b>32542</b>

Tab. 6-4 Seznam jednotlivých položek simulátoru pro variantu 3 bez počítače a monitoru.

Položka	Cena v Kč bez DPH
Saitek Pro Flight X55 Rhino H.O.T.A.S. System	4129
Saitek Pro Flight Rudder Pedals	3298
X-Plane 10	1570
<b>Celkem</b>	<b>8997</b>



## 7 ZÁVĚR

---

### 7.1 Výběr simulátoru

Prvním úkolem práce bylo vytvořit přehled dostupných komerčních simulátorů a na jejím základě vybrat nejvhodnější simulátor pro účely cílů práce. Po bližším studiu jednotlivých simulátorů byl jako nejvhodnější zvolen simulátor X-Plane. Svým ojedinělým přístupem s důrazem na minimalizaci potřebných parametrů pro definici modelu umožňuje relativně rychlý vývoj virtuálního modelu. Dohledání přesných metod a způsobů výpočtů, které simulátor používá, bylo poměrně obtížné. Vzhledem k tomu, že se jedná o komerční produkt, je však pochopitelné, že autoři nechtějí prozradit své know-how.

### 7.2 Vývoj virtuálního modelu

V průběhu vývoje se naskytly určité potíže při použití programů Plane-Maker a Airfoil-Maker, které jsou důležitou součástí simulátoru. Nedostatky programu Plane-Maker jsou zejména v komplikovaném způsobu modelování trupu letounu a v nemožnosti přesněji definovat určité parametry. Co se týče programu Airfoil-Maker, je možné říci, že definice profilu křídla je díky němu velmi snadná. Jednoduchost zadávání ovšem vede do jisté míry k nepřesnému proložení poláry v oblasti za hranicí kritického úhlu náběhu.

I přes drobné nedostatky jsou však tyto programy velikou předností simulátoru X-Plane. Jejich uživatelské prostředí je velice intuitivní a použití těchto programů výrazně usnadňuje proces přiřazení odpovídajících fyzikálních vlastností letovému modelu. Navíc, jakékoli parametry či vlastnosti letounu lze přidat, upravit či ovládat pomocí pluginů, které je možné pro simulátor doprogramovat.

Celkově zabrala tvorba modelu letounu přibližně 320 hodin, což činí cca 75% času vypracování celé bakalářské práce. Nezkušenému vývojáři by práce trvala podstatně déle. Faktorem výrazně ovlivňujícím dobu vývoje je také tvorba grafického modelu. Vzhledem ke skutečnosti, že tento model nemá vliv na samotný letový model, však tato fáze vývoje není nezbytná.

### 7.3 Výsledný virtuální model

Nad rámec cílů práce byla provedena validace modelu na základě letových měření a předběžného návrhu letounu VUT-061 Turbo. Je nutno podotknout, že letoun byl definován pouze na základě geometrie letounu, dat dostupných z letové příručky letounu a z aerostatických podkladů. Z aerostatických podkladů byly převzaty pouze aerodynamické charakteristiky profilů křídel a součinitel odporu trupu. Na základě měření již neprobíhaly žádné další úpravy modelu, kterými bychom se snažili více přiblížit reálným výsledkům.

Ze srovnání modelu s reálným letounem vyplývá, že pádová rychlost velmi dobře odpovídá skutečnosti. Maximální rychlost v X-Plane vyšla oproti reálným měřením o 9 km/h nižší, rozdíl tedy činí 4 %. Za povšimnutí stojí fakt, že zatímco stoupavost je na vysokém úhlu

náběhu predikována velmi špatně, na nízkých úhlech náběhu (vysokých rychlostech) se blíží skutečnosti.

Z hlediska srovnávaných výkonů letounu se X-Plane ukázal jako vhodný nástroj. Z hlediska letových vlastností to však z našich měření nelze posoudit a mohlo by to být námětem pro pokračování této práce.

## **7.4 Fyzické dokončení simulátoru**

Návrh dokončení fyzického simulátoru byl rozdělen do tří cenových kategorií. Cena nejdražší a nejkvalitnější verze, která by byla vhodná pro profesionální použití, by byla přibližně 98 000 Kč. Levnější verzi, která by však stále umožňovala používat simulátor profesionálně i pro komerční účely (např. výcvik pilotů či dny otevřených dveří na FSI) by bylo možné pořídit za necelých 50 000 Kč. Nejlevnější varianta určená pouze pro domácí použití by vycházela lehce přes 32 000 Kč. S využitím vlastní počítačové sestavy by se cena snížila na přibližně 9 000 Kč.

## **7.5 Možné směry dalšího rozvoje tématu**

V této práci byly porovnávány především výkony letounu, a proto mnoho parametrů nebylo přesně specifikováno. V programu Plane-Maker je však možné definovat velké množství dalších parametrů, čímž bychom mohli získat přesnější model v širším rozsahu letových charakteristik či jednotlivých systémů (např. elektrická síť, palivový systém a další). Dále by bylo vhodné porovnat výkony letounu i s vysunutou vztlakovou mechanizací, která je v tomto modelu definovaná zjednodušeně.

VUT-061 Turbo je pouze experimentální letoun, mohlo by proto být přínosnější pokračovat vývojem modelu běžnějšího letounu, který se používá při výcviku pilotů. X-Plane umožňuje simulování poruch prakticky všech částí letounu, a proto by vzniklý model mohl fungovat jako trenažér pro cvičení standardních či nouzových postupů pilotů, popřípadě by bylo možné zakoupit již vyvinutý model letounu od jednoho z komerčních developerů letounů pro X-Plane.

## **7.6 Závěrečné hodnocení**

V této práci jsem se snažil vyzdvihnout přednosti vývoje virtuálních letounů pro simulátor X-Plane, který se v současné době stále v České republice tolik nevyužívá. Největší přednost vidím ve skutečnosti, že letoun je možné definovat pomocí relativně dostupných dat, na rozdíl od simulátorů založených na technologii ESP, kde je nutné znát přesné hodnoty řiditelnostních a stabilitních derivací. X-Plane umožňuje vytvořit letový model i bez znalosti hodnot daných derivací a je tedy možné jej používat ne jen jako trenažér pro studenty oboru Profesionální pilot, ale také jako nástroj pro získání prvotního vodítka při návrhu nových designů letadel. Na základě získaných dat by vývoj letounu mohl následně pokračovat konvenčním způsobem. K získaným datům ze simulátoru by se však mělo přistupovat s obezřetností a vývoj by měl probíhat ve spolupráci s odborníky na jednotlivé oblasti letectví a také s piloty.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

---

- [1] 2. místo: První brněnská strojírna Velká Bíteš a VUT Brno / létající laboratoř pro testování turbovrtulové pohonné jednotky: (létající laboratoř turbovrtulového motoru TP 100). *Nejlepší spolupráci předvedly v loňském roce TESCANA a VUT v Brně* [online]. 2013, 2 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: [https://www.tacr.cz/dokums\\_raw/media/Technicky\\_tydenik\\_clanek\\_05112013.pdf](https://www.tacr.cz/dokums_raw/media/Technicky_tydenik_clanek_05112013.pdf)
- [2] About VolairSim. *VolairSim* [online]. Carmel, Spojené státy americké, 2015 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.volairsim.com/about.html>
- [3] A New Era in Visual Simulation. *Reality XP Simulation* [online]. 2010 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.reality-xp.com/professional/files/Microsoft%20ESP%20Datasheet.pdf>
- [4] DANĚK, Vladimír. *Mechanika Letu II: Letové vlastnosti*. BRNO: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,s.r.o., 2011. ISBN 978-80-7204-761-1
- [5] Developers' Corner: A New Home for Flight Simulator Developer Resources. *Oficiální domovská stránka Microsoft* [online]. 2009 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/Products/Games/FSInsider/developers/Pages/>
- [6] DOUPNÍK, Petr. *Aerostatické podklady letounu vut 061 turbo*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 2012. Číslo zprávy LU53-2010-MTP.AD.
- [7] How X-Plane Works. *X-Plane 10 Global: The World's Most Advanced Flight Simulator* [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.x-plane.com/desktop/how-x-plane-works/>
- [8] Introduction to FlightGear. *FlightGear Flight Simulator* [online]. 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.flightgear.org/about/>
- [9] *JSBSim Open Source Flight Dynamics Model* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://jsbsim.sourceforge.net/>
- [10] *Letová příručka letounu VUT 061 Turbo: Návrh č. 1* [pdf]. [Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav], 1. 4. 2013 [cit. 2016-03-21]. Číslo dokumentu LU 53-2012-MTP.AW.
- [11] MATĚJČŮ, J. *Hodnocení stability a říditelnosti čtyřmístného, jednomotorového letounu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 66s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Daněk, CSc.
- [12] Meet X-Plane Professional. *X-Plane 10 Global: The World's Most Advanced Flight Simulator* [online]. 2016 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.x-plane.com/pro/landing/>
- [13] *Operation And Installation Manual* [pdf]. 3. vyd. Praha: Avia Propeller s.r.o., 2010 [cit. 2016-03-30].
- [14] Overview. *Microsoft ESP* [online]. 2008 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc526961.aspx>
- [15] Plane Maker Manual. *X-Plane Developer* [online]. 2016 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://developer.x-plane.com/manuals/planemaker/>

- [16] Prepar3D® Product Overview. *Lockheed Martin - Prepar3D* [online]. 2010 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.prepar3d.com/product-overview/>
- [17] Professional and educational FlightGear users. *FlightGear wiki* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: [http://wiki.flightgear.org/Professional\\_and\\_educational\\_FlightGear\\_users](http://wiki.flightgear.org/Professional_and_educational_FlightGear_users)
- [18] Sample: JetSample.asm. Microsoft ESP [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc707065.aspx>
- [19] The Many Benefits of PC-Based Flight Simulation: Today's desktop simulators are much more than just surrogate aircraft. *Flight1 Aviation Technologies* [online]. 2015 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.flight1tech.com/WhySimulation.aspx>
- [20] The Story of Flight Simulator. *Flight Simulator History* [online]. 2005 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://fshistory.simflight.com/fsh/versions.htm>
- [21] TRACKIR 5. *Home / TrackIR* [online]. 2016 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <https://naturalpoint.com/trackir/trackir5/>
- [22] DRÁBEK, Armand, Pavel HOSPODÁŘ a Petr VRCHOTA. Výpočetní metody při návrhu malého nekonvenčního letounu. *TRANSFER: Výzkum a vývoj pro letecký průmysl* [online]. Praha: VZLÚ, 2011, **2011**(15), 44-47 [cit. 2016-05-25]. ISSN 1801-9315.
- [23] URÍK, Tomáš. *Rozbor hmotností a centrází letounu VUT 061 Turbo* [pdf]. 8. 8. 2011. Brno: Letecký ústav, VUT v Brně, 2011 [cit. 2016-03-30]. Výzkumná zpráva č. LU44-2010-MTP.W, 12 s.
- [24] USAF Stability and Control DATCOM, Vol.1-4. FairBorn (OH): Flight Control Division, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright Patterson Air Force Base, 1978
- [25] X-Plane 10 Desktop Manual. *X-Plane 10 Global: The World's Most Advanced Flight Simulator* [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.x-plane.com/manuals/desktop/#x-plane10global>
- [26] X-Plane versus Microsoft Flight-Sim: which should you play? PRESLEY, Paul. *PC Games News* [online]. 2012 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.pcgamesn.com/flightsim/x-plane-versus-microsoft-flight-sim-which-should-you-play>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Veličina
$\Delta H$	[m]	výškový rozsah
$C_D$	[-]	součinitel odporu letounu
$C_L$	[-]	součinitel vztlaku letounu
$H$	[m]	výška
$H_P$	[m]	pracovní výška
$M$	[kg]	hmotnost
$n$	[-]	násobek zatížení letadla
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha křídla
$t$	[°C]	teplota
$V_{CAS}$	[km.h <sup>-1</sup> ]	kalibrovaná rychlost
$V_{EAS}$	[km.h <sup>-1</sup> ]	rychlost za standardního tlaku při 0 m MSA
$V_{IAS}$	[km.h <sup>-1</sup> ]	indikovaná rychlost na rychloměru
$V_{NO}$	[km.h <sup>-1</sup> ]	maximální rychlost v normálním provozu
$V_{SI}$	[km.h <sup>-1</sup> ]	pádová rychlost CAS v cestovní konfiguraci
$V_{TAS}$	[km.h <sup>-1</sup> ]	skutečná vzdušná rychlost
$W$	[m.s <sup>-1</sup> ]	vertikální rychlost
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu
$\rho_0$	1,225 [kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu při 0 m MSA
Zkratky	Význam	
BET	Blade Element theory	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
ESP	Microsoft ESP™	
FSI	Fakulta strojního inženýrství	
FSX	Flight Simulator X	
LÚ	Letecký ústav VUT	
P3D	Prepar3D	
SK	výškové kormidlo	
VS	směrové kormidlo	
XP	X-Plane	

## 10 PŘÍLOHY

---

### Příloha 1: Definování vrtule

Při definování vrtule byl zadán její průměr, úhly natočení a zároveň byl podle výkresové dokumentace vrtule vymodelován tvar listů. Pro výpočet chování vrtule je v X-Plane opět použito metody BET. Program Plane-Maker umožňuje zadat mnoho dalších parametrů, zpřesňující geometrii a chování vrtule. Tyto parametry se nám však nepodařilo získat, nebo nebyly důležité pro naše měření.

Jednalo se o:

- Přibližný úhel nastavení vrtule při alfa módu
- Přesný úhel nastavení vrtule při alfa módu
- Úhel nastavení vrtule beta
- Tětiva konce listu vrtule
- Tětiva kořene listu vrtule

Plane-Maker dokáže některé tyto parametry přibližně určit podle již zadaných parametrů. V takovém případě jsme určenou hodnotu daných parametrů neměnili.

Další možná specifikace je určení profilů listů vrtule. Tyto informace jsme také nemohli dohledat. Pro kořen listů jsme použili NASA LS-0417 a pro konce listů NACA 2412.

Hmotnosti vrtule se definuje jako poměr hmotnosti dané vrtule k hmotnosti vrtule vyrobené z čistého hliníku. Materiál vrtule není v dokumentaci přesně uveden, je specifikován pouze jako slitina hliníku. Proto byla při určení poměru zvolena hodnota 1.

## Příloha 2: Ukázka části souboru AIR

Soubor AIR definuje matematicko-fyzikálního model letounu v simulátorech používajících technologii ESP™.

```
; Sample Jet flight dynamics file
;
    include asm.inc           ; include this in ALL .asm files!
    include airtoken.inc      ; definitions of token macros
    include siml.inc          ; definitions of token values

.data

sim_data          label    byte

;*****START OF AERODYNAMIC DATA *****
;**** BEGINNING OF REQUIRED AERODYNAMICS *****

;The following 6 blocks define the base stability and control derivatives
;Lift, Drag, Pitch, Side Force, Roll, and Yaw.

    TOKEN_BEGIN      AIR_80_LIFT_PARAMS
    REAL8            -0.480000    ; CL spoiler
    REAL8            0.491244    ; CL flaps
    REAL8            0.000000    ; UNUSED
    REAL8            0.353935    ; CLih
    REAL8            -0.134961    ; CLde
    REAL8            0.000000    ; UNUSED
    TOKEN_END

    TOKEN_BEGIN      AIR_80_DRAG_PARAMS
    REAL8            0.051        ; CDo
    REAL8            0.080000    ; CD flaps
    REAL8            0.007000    ; CD gear
    REAL8            0.130000    ; CD spoiler
    TOKEN_END

    TOKEN_BEGIN      AIR_80_PITCH_PARAMS
    REAL8            -1.423802    ; CMih
    REAL8            -1.4        ; CMde
    REAL8            0.000000    ; CMde due to propwash
    REAL8            -3.966478    ; CLq
    REAL8            0.770403    ; CL adot
    REAL8            5.099159    ; CM adot
    REAL8            -91.0        ; CMq
    REAL8            0.000000    ; CMq due to propwash
    REAL8            -0.02        ; CMo
    REAL8            -0.002        ; CM flap
    REAL8            -7.119009    ; CM delta trim
    REAL8            0.010000    ; CM spoiler
    TOKEN_END
```

### **Příloha 3: Ukázka virtuálního modelu letounu VUT-061 TURBO**



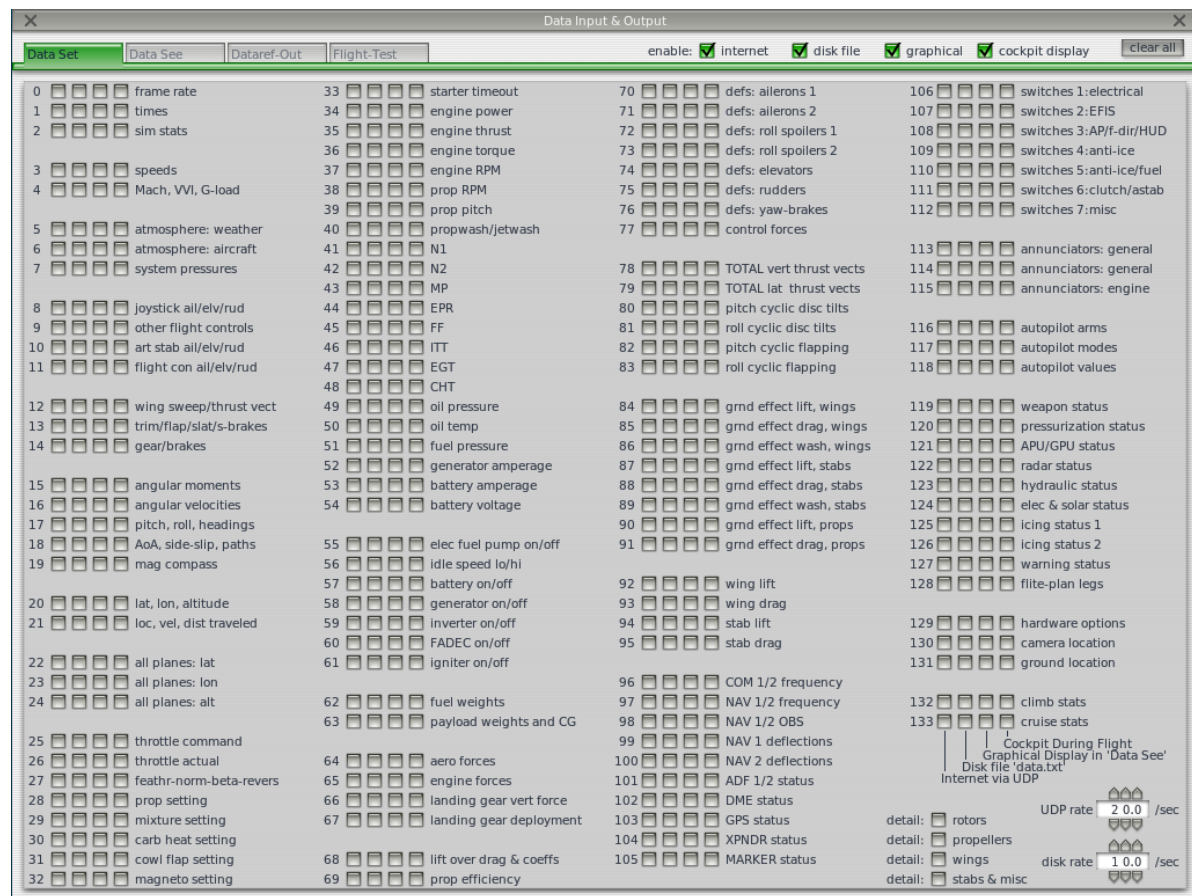
Obr. 10-1 Pohled na letoun VUT-061 Turbo.



Obr. 10-2 Zobrazení rozložení vztlaku na křídlech.



## Příloha 4: Nabídka „Data Input & Output“ umožňující výpis dat z X-Plane



**Příloha 5: Bakalářská práce v elektronické podobě a virtuální model letounu VUT-061 Turbo na CD**

- BP\_2016\_Mamula\_Marko\_161613.pdf
- VUT-061\_Turbo\_BP\_2016\_Mamula\_Marko\_161613.zip